

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia

**Estratégia de Operação de Sistemas Híbridos Solar-
Eólico baseada em Índices de Complementaridade**

Autor: Nyanne Brito de Souza
Orientador: Jorge Andrés Cormane Angarita

Brasília, DF

2014



NAYANNE BRITO DE SOUZA

**ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS SOLAR-EÓLICO
BASEADA EM ÍNDICES DE COMPLEMENTARIDADE**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dr. Jorge Cormane Angarita.

Brasília, DF

2014

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Brito de Souza, Nyanne.

Estratégia de Operação de Sistemas Híbridos Solar-Eólico baseada em Índices de Complementaridade/ Nyanne Brito de Souza. Brasília: UnB, 2014. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Jorge Andrés Cormane Angarita.

1. Estratégia de Operação. 2. Sistemas Híbridos. 3. Índices de Complementaridade I. Cormane Angarita, Jorge Andrés. II. Eng. Dr.

CDU Classificação



ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS SOLAR-EÓLICO BASEADA EM ÍNDICES DE COMPLEMENTARIDADE.

Nayanne Brito de Souza

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 18/11/14 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Jorge Andrés Cormane Angarita, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr: Augusto César Brasil, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr: Luciano Noletto, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2014

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Rawlinson e Helena, por terem se esforçado tanto para me dar a melhor educação, os melhores exemplos e todos pequenos sacrifícios cotidianos entre caronas, empréstimos e compreensão.

Ao meu irmãozinho, Guilherme, que mesmo sem saber o que acontece ao seu redor muito me ajudou com brincadeiras e renovação de ânimo.

Aos primos e tios que sempre foram tão gentis e solícitos, igualmente compreensíveis por tantas vezes abdiquei de férias e momentos em família por causa do calendário assíncrono da UnB.

Aos amigos por todo o apoio, risos compartilhados e ombros emprestados quando foi preciso, também ao meu namorado Fábio por dividir tantas afinidades, conversas, sonhos e incertezas, sempre me motivando e me fortalecendo.

Gostaria de agradecer igualmente à UnB, por todo o conhecimento dividido, oportunidades de monitoria, viagens, congressos, projetos de pesquisa e intercâmbios que tanto contribuíram para meu amadurecimento profissional e pessoal. Agradeço também aos colegas de curso e todas as horas de estudo que dividimos, dúvidas, frustrações e sucessos.

Quero agradecer os profissionais da ABRACE por ter me dado a primeira oportunidade de estágio em que tanto aprendi sobre o mercado de trabalho e da energia no Brasil; onde tive a certeza de que escolhi a profissão certa para seguir.

Agradeço à equipe do L2ED-CEA, onde estagiei em Grenoble-França, por terem me dado uma dose extra de motivação e confiança em meu potencial, além da ajuda em todos os desafios inerentes ao trabalho no exterior.

Por último, mas não menos importante, ao caro professor Jorge Corname por ter me dedicado suas preciosas horas, podando meu trabalho e direcionando meus esforços tornando possível a elaboração com sucesso desse trabalho.

Mais uma vez, obrigada a todos, sem vocês cada pequena meta alcançada em não teria se concretizado.

*"A atividade vence o frio, a inatividade, o calor.
Assim, vai o sábio corrigindo tudo no mundo."
(Tao-Te-Ching)*

RESUMO

O trabalho de conclusão de curso sobre estratégias de operação de sistemas híbridos solar-eólico mostrou como os índices de complementaridade entre fontes renováveis podem ser usados para tomada de decisão sobre a forma de operar um sistema híbrido. A estratégia aqui proposta consiste em comparação da complementaridade com um valor ótimo para posterior escolha de qual fonte será privilegiada. Esse trabalho foi concluído com estudo comparativo de dados meteorológicos entre as fontes, a proposição de uma estratégia de operação e seu teste em programas específicos de simulação de sistemas híbridos. Concluindo que os índices de complementaridade são representativos e representam economia da operação e manutenção dos sistemas, trazendo benefícios também na vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave: Sistemas Híbridos, Índices de Complementaridade, Estratégia de Operação.

ABSTRACT

The Energy Management Strategies on photovoltaic-wind hybrid systems has shown how complementarity index calculated to renewable sources can be used to decide how to operate a hybrid system. The strategy proposed works on systems with energy storage and connected to the grid, it consists on a comparison to a standard complementarity index followed by a choice of witch source are going to be used to generate electricity. The conclusion was achieved by the comparative study of the meteorological data, proposal of energy management strategy and its test on a known software. The complementarity index are representatives and they correspond to a decrease of operating and maintenance costs, also contributing to increase the lifetime of the equipments.

Keywords: Hybrid Systems. Complementarity Index. Energy Management Strategy.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Transformação de Irradiação Global para Útil. Fonte: Autora.	15
Figura 2. Modelo Dinâmico de Bateria. Fonte: Fraga, 2009.....	19
Figura 3. Modelo Simples de Bateria. Fonte: Fraga, 2009.....	20
Figura 4. Índices de Complementaridade Ótimos. Fonte: Beluco, 2001.	23
Figura 5. Arquitetura do Sistema Híbrido Considerado. Fonte: Autora.	26
Figura 6. Carga Representativa do consumo no Centro-Oeste	27
Figura 7. Irradiância Solar em Brasília. Fonte: Autora.	29
Figura 8. Histograma de velocidade do vento em Brasília	30
Figura 9. Densidade de Potencial Solar e Eólico de Brasília. Fonte: Autora.....	31
Figura 10. Média Diária do Potencial Solar e Eólico. Fonte: Autora.....	31
Figura 11. Complementaridade no Tempo a longo do ano	33
Figura 12. Comparação entre Índice de Complementaridade de disponibilidade, potencial solar e eólico.	34
Figura 13. Síntese da estratégia	36
Figura 14. Estratégia de Operação baseada em índices de complementaridade. Fonte: Autora.	37
Figura 15. Radiação Média Diária e Índice de Claridade	42
Figura 16. Potencial Eólico.....	42
Figura 17. Distribuição de tarifas de compra e venda de energia da rede	43
Figura 18. Parâmetros Econômicos Homer	43
Figura 19. Disponibilidade Solar Adaptada.....	44
Figura 20. Dimensionamento Ótimo CC	45
Figura 21. Produção de Eletricidade por fonte CC	46

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos	13
2	Revisão Bibliográfica.....	14
2.1	Módulos Fotovoltaicos.....	14
2.1.1	Incidência Solar	14
2.1.2	Modelo matemático para módulos fotovoltaicos planos	15
2.2	Turbinas Eólicas.....	16
2.2.1	Incidência de vento	16
2.2.2	Curva de Weibull	16
2.2.3	Rosa dos Ventos	17
2.2.4	Potencial do Vento.....	17
2.3	Estocagem de Energia em Baterias	18
2.3.1	Modelo Matemático para Baterias.....	18
2.3.1.1	Modelo Dinâmico de Bateria	18
2.3.1.2	Modelo Simples de Bateria.....	20
2.4	Estratégias de Operação de Sistemas Energéticos Híbridos.....	20
2.4.1	Custo Crítico do Combustível	21
2.4.2	Seguimento de Carga	21
2.4.3	Ciclo de carga do armazenamento	21
2.4.4	Loop de Histereses	21
2.5	Indicadores.....	22
2.5.1	Indicadores Meteorológicos	22
2.5.2	Indicadores econômicos	22
		10

2.6	Índices de complementaridade.....	23
2.6.1	Cálculos de índices.....	23
2.6.1.1	Complementaridade no Tempo	24
2.6.1.2	Complementaridade de Disponibilidade	24
3	Materiais e Métodos	26
3.1	Arquitetura do Sistema Híbrido e Componentes.....	26
3.2	Carga	27
3.3	Dados meteorológicos.....	28
3.3.1	Irradiância Solar.....	28
3.3.2	Velocidade dos Ventos	29
3.3.3	Comparação entre potenciais Solar e Eólico	30
3.4	Cálculo dos Índices de Complementaridade	32
3.4.1	Índice de complementaridade no tempo [It]	32
3.4.2	Índice de complementaridade de disponibilidade [Ie].....	33
3.5	Estratégia de Operação baseada em Índices de Complementaridade	34
3.6	Módulo fotovoltaico	39
3.7	Turbina Eólica	39
3.8	Rede de distribuição de eletricidade.....	40
3.9	Simulação no <i>Homer</i>	41
3.9.1	Simulação com a estratégia CC e LF.....	41
3.9.1.1	Dados de entrada.....	41
3.9.2	Simulação com estratégia baseada em índices de complementaridade.....	44
4	Resultados	45
5	Conclusão	48
6	Trabalhos Futuros	49
7	Bibliografia	50

1 Introdução

O setor de energia é estratégico para uma nação, por isso é prudente ter diversidade de fontes de energia para garantir a segurança energética e diminuir a dependência de combustíveis externos, assim, o país fica menos sujeito a variações na política e economia internacional. O desenvolvimento das energias renováveis tem por objetivo reduzir as emissões de gases nocivos e igualmente diversificar as fontes de energia primária para posterior transformação em elétrica.

As fontes renováveis de energia são aquelas que fazem parte de um ciclo cuja origem direta ou indireta é o Sol. Essas fontes são gratuitas e inesgotáveis, porém seu aproveitamento é limitado pelas características sazonais e espaciais do local escolhido (Bal, 2001). O potencial energético dos recursos não são facilmente estimáveis, essa característica é provavelmente o maior problema desse tipo de geração, já que a relação entre consumo e produção deve ser satisfeita de forma instantânea. A fim de uniformizar a produção de energia no tempo, propõe-se o aproveitamento simultâneo de vários tipos de recursos energéticos para produção de energia elétrica (Guinot, 2013).

O aproveitamento simultâneo de diferentes recursos energéticos busca explorar a complementaridade de tempo e de potencial entre fontes de energia. Uma forma de explorar essa complementaridade é a utilização de Sistemas Híbridos para a geração de eletricidade.

Os sistemas híbridos vieram como opção tecnológica para suprir demandas energéticas de áreas remotas onde o consumo elétrico da população não justifica os altos investimentos necessários para a interligação com a rede. Mesmo assim esses sistemas pecam em relação a segurança para o fornecimento de eletricidade. Na atualidade, tais sistemas são utilizados em áreas urbanas, com a disseminação de geração distribuída (Pinho, 2008).

Os sistemas híbridos para produção de eletricidade são caracterizados pelas tecnologias de conversão que os compõem, a arquitetura de seus componentes e sua estratégia de operação.

O desenvolvimento desse trabalho se deu com o cálculo dos índices de complementaridade e análise de uma estratégia de operação genérica, observando como elas podem se relacionar para que finalmente uma estratégia agregando os índices de complementaridade possa ser definida.

A principal contribuição dessa estratégia de operação baseada em índices de complementaridade é permitir a exploração inteligente dos recursos disponíveis para que seja possível maximizar a geração de eletricidade com o menor custo.

O trabalho inicialmente aborda o referencial bibliográfico no capítulo 2, mostrando o que já existe na bibliografia em relação à tecnologia de transformação de energia e operação de sistemas híbridos.

O capítulo 3 mostra os materiais e métodos utilizados ao longo do trabalho, com modelos matemáticos dos equipamentos utilizados e base de dados para o cálculo. No capítulo 4 se discute os principais resultados adquiridos com o estudo seguido da conclusão e da lista de bibliografia consultada.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização de índices de complementaridade como critérios de decisão na operação de sistemas híbridos para geração de eletricidade.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias disponíveis para implementação de sistemas híbridos;
- Estimar o potencial energético a partir de dados meteorológicos;
- Estudar a aplicação dos índices de complementaridade;
- Propor uma estratégia de operação para um sistema híbrido baseado na utilização de índices de complementaridade, disponibilidade energética e carga.

2 Revisão Bibliográfica

Um sistema híbrido é composto por diferentes tecnologias cada uma delas com características próprias quanto sua operação. Essa seção mostrará o modelo das tecnologias de conversão de energia consideradas, bem como as de armazenagem e operação do sistema.

2.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são equipamentos que produzem eletricidade a partir do aproveitamento da radiação solar que atinge a superfície terrestre.

2.1.1 Incidência Solar

A produção de eletricidade a partir de um módulo fotovoltaico depende da incidência de Sol e da temperatura ambiente. A luz do Sol é composta por raios diretos, difusos e refletidos. Os raios diretos vêm diretamente do Sol; os difusos são os espalhados pelas nuvens e obstáculos naturais da atmosfera e o refletido vem majoritariamente do solo, mas dependendo da região, pode vir de montanhas ou prédios (Hinrichs, 2004).

A maioria das estações meteorológicas possui um único sensor que mede a irradiação global horizontal, ele capta o raio direto e difuso horizontal. Como a região de Brasília é plana, a fonte de raios refletidos é do solo e eles não são sentidos (Guinot, 2013).

O sistema híbrido em questão utiliza módulos fotovoltaicos planos, como é sabido, eles devem ter certa inclinação em relação horizontal para maximizar o aproveitamento da luz solar. Nesse caso, a irradiação a ser considerada é no plano inclinado e por isso o raio refletido volta a ser importante. A figura a seguir mostra o processo de transformação da irradiação incidente até a irradiação que produzirá eletricidade por meio do módulo fotovoltaico.

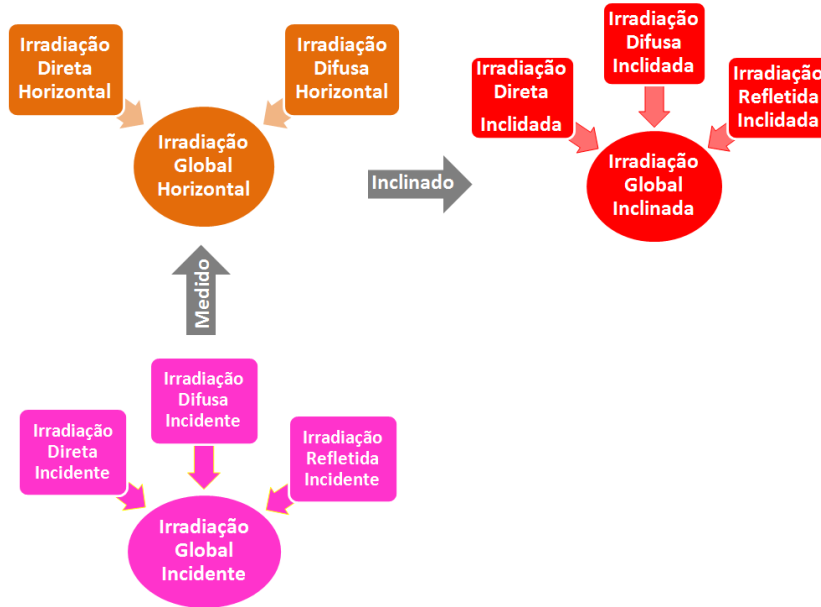


Figura 1. Transformação de Irradiação Global para Útil.

A Figura 1 esquematiza o processo para prever a irradiação que servirá para produzir eletricidade por meio do módulo fotovoltaico. Como exemplo de algoritmos de separação entre raios difusos e diretos medidos pela estação meteorológica pode-se citar Reindl (Reindl,1990), como exemplo de algoritmos de transformação para o plano inclinado, cita-se: Perez, HDKR e RBD (SAM, 2014).

2.1.2 Modelo matemático para módulos fotovoltaicos planos

Para prever a produção de eletricidade por um módulo fotovoltaico, é importante prever a temperatura interna no módulo. Existem vários modelos matemáticos sendo que os mais utilizados são os chamados polinomiais, exposto na equação seguinte (Marion, 2005).

$$T_c = T_a + \bar{G}_T \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{\bar{G}_{T,NOCT}} \right) \left[1 - \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right] \quad (1)$$

$$P_s = Y_{PV} f_{PV} \frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \left[1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC}) \right] \quad (2)$$

T_c = temperatura interna no módulo fotovoltaico [°C];

T_a = temperatura ambiente [°C];

\bar{G}_T = irradiação solar incidente [kW/m²];

$T_{c,NOCT}$ = temperatura interna do módulo fotovoltaico nas condições nominais de operação [°C];

$T_{a,NOCT}$ =temperatura ambiente nas condições nominais de operação [°C];

η_c = rendimento elétrico da célula [%];

$\tau\alpha$ = transmissividade e absorvitância;

P_s = potência fotovoltaica [kW];

Y_{PV} = capacidade máxima nas condições de teste [kW];

f_{PV} = fator de perda relacionado à poeira, conexões nos fios[%];

$\bar{G}_{T,STC}$ = irradiação solar incidente nas condições de teste [kW/m²];

α_p = coeficiente de temperatura [%/°C];

$T_{c,STC}$ = temperatura interna do módulo fotovoltaico nas condições de teste [°C].

2.2 Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas são dispositivos que adquirem momento a partir do movimento da massa de ar e o converte em energia elétrica por meio de um gerador acoplado às pás.

2.2.1 Incidência de vento

Os dados meteorológicos importantes para a produção eólica são a intensidade em certa altura e a direção do vento. A partir desses valores é possível plotar um histograma das velocidades e saber a probabilidade de cada intensidade e direção. Assim a decisão de onde ou que tipo de turbina eólica implementar fica mais evidente, propiciando mais segurança energética.

Esse estudo deve ser feito utilizando dados meteorológicos históricos do local visado, produzindo como resultados gráficos sobre a probabilidade de velocidades do vento e de direções.

2.2.2 Curva de Weibull

A curva de Weibull é a distribuição de probabilidade mais usada para prever as velocidades do vento. Essa função é adequada por ser mais precisa já que tem dois parâmetros, um de escala e outro de forma. Há também autores que defendam a utilização das funções de Rayleigh e Log-Normal (Sansigolo, 2005).

A função densidade de probabilidade Weibull é dada pela equação:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (3)$$

V=Velocidade do vento em m/s;

$$k = \left(\frac{\sigma}{Vm}\right)^{1,086};$$

$$C = \frac{Vm}{\gamma(1+1/k)};$$

σ = variância;

Vm = velocidade média;

C = distribuição gama do valor $1+1/k$.

2.2.3 Rosa dos Ventos

A rosa dos ventos é um gráfico polar que mostra a intensidade e direção do vento em um dado espaço amostral. Como dados de entrada são utilizados a velocidade do vento e a direção em graus e a partir deles é possível prever a direção com maior espectro de energia e explorar o potencial do vento da região com maior rendimento.

2.2.4 Potencial do Vento

A potência que pode ser extraída do vento para gerar eletricidade é a proveniente da energia cinética. Por meio dos movimentos da massa de ar é possível transferir quantidade de movimento para turbinas eólicas que por sua vez, ligadas a um gerador produzem eletricidade.

A potência é a taxa de energia no tempo e o fluxo mássico é a quantidade de massa de ar por unidade de área, seguindo as respectivas equações pode-se chegar ao potencial do vento por unidade de área (Çengel, 2012).

$$\dot{m} = \rho * V * A \quad (4)$$

$$\frac{dE}{dT} = \frac{\dot{m} * V^2}{2} \quad (5)$$

A equação 4 é a de fluxo mássico, dada em [Kg/s], a equação 5 é potência escrita em função da energia cinética, calculada em [W].

ρ =densidade do ar local;

A =área da superfície exposta de pode gerar potência;

V =velocidade do vento.

Assim, combinando as equações (4) e (5) concluí-se que o potencial por unidade de área:

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho \cdot V^3}{2} \quad (6)$$

A equação acima é útil para deixar o potencial da energia eólica e solar nas mesmas unidades, para que assim seja mais fácil a comparação e avaliação de complementaridade entre elas.

2.3 Estocagem de Energia em Baterias

As fontes renováveis têm como característica intrínseca o fato de serem intermitentes e possuírem baixo grau de previsibilidade. Uma solução clássica para esse problema é a utilização das baterias. As baterias são dispositivos que guardam energia na forma química, por isso possuem rápido tempo de resposta e podem corrigir instantaneamente flutuações de produção de eletricidade, porém pouco adaptadas para armazenagem por um longo período de tempo (Barreto, 2008).

As baterias apropriadas ao caso de um sistema híbrido solar-eólico possuem características de ciclos diários e rasos. A maior necessidade é suprir a demanda durante a noite e corrigir flutuações, fato que não exige muita energia, como mais adequado a esse tipo de uso são as de chumbo ácido e níquel-cádmio (Barreto, 2008).

2.3.1 Modelo Matemático para Baterias

A previsão do funcionamento da bateria, sua vida útil, a quantidade de energia disponibilizada, perdida e capacidade de estocagem é feita por meio de modelagens matemática. Para as aplicações em sistemas híbridos, as mais encontradas nas bibliografias consultadas foram modelo dinâmico de bateria [Kinectic Battery Model - KiBaM] e o modelo simples (Fraga, 2009).

2.3.1.1 Modelo Dinâmico de Bateria

Esse modelo foi proposto inicialmente por Jayne e Morgan em 1986 e submetido à adaptações empíricas pelos mesmos autores, culminando no modelo

publicado na revista *Solar Energy* exposto na Figura 2, adaptado a sistemas híbridos.

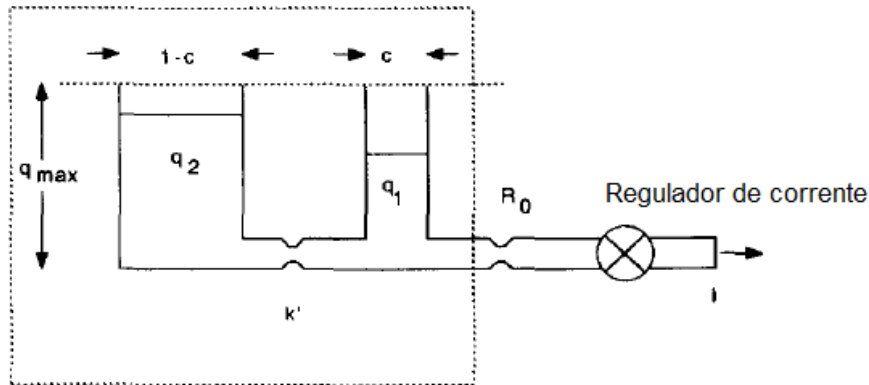


Figura 2. Modelo Dinâmico de Bateria. Fonte: Fraga, 2009.

O modelo da Figura 2 representa a bateria como dois tanques de energia, uma conexão entre os tanques e uma válvula que conecta a bateria ao sistema externo. O tanque q_1 é a energia disponível para alimentar a carga, o tanque q_2 é a energia guardada que pode ser usada no limite. A conexão entre os tanque k' seria a condutância em baterias reais, simbolizando a velocidade com que a energia armazenada pode ser transferida para o tanque de energia disponível para ser utilizada pela carga.

Assim, resolvendo as equações para q_1 e q_2 em função do tempo pode-se prever a velocidade de carga e descarga, bem como a quantidade de energia nas duas situações.

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k(1 - c)q_1 + k c q_2 \quad (6)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k(1 - c)q_1 - k c q_2 \quad (7)$$

$$k = \frac{k'}{c[1 - c]} \quad (8)$$

I = corrente na bateria constante em cada passo [A];

k = variável auxiliar adimensional;

c = energia em um tanque [Wh].

Manipulando as equações acima se pode conhecer o comportamento da bateria no tempo, quanto tempo de carga é possível suprir caso elas sejam

acionadas e em quanto tempo elas serão carregadas, ou seja, a maior parte dos dados importantes para a utilização trabalhada no contexto desse trabalho.

2.3.1.2 Modelo Simples de Bateria

O modelo simples de bateria a considera como um circuito elétrico, levando em conta apenas a tensão de circuito aberto, a resistência interna e a tensão nos terminais da bateria, como mostrado na figura abaixo.

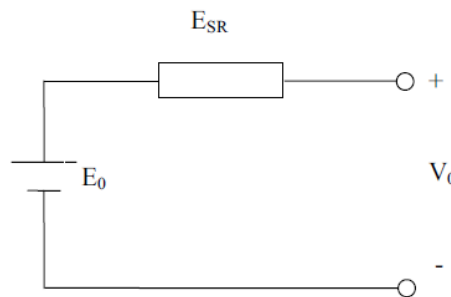


Figura 3. Modelo Simples de Bateria. Fonte: Fraga, 2009.

Na Figura 3 E_0 é a tensão de curto circuito, E_{SR} a resistência interna e V_0 a tensão nos terminais. No âmbito da utilização em sistemas híbridos é interessante conhecer os tempos de carga e descarga, por isso o modelo mais apropriado é o modelo dinâmico.

2.4 Estratégias de Operação de Sistemas Energéticos Híbridos

Um sistema híbrido é composto por diversos equipamentos diferentes que podem atuar com várias combinações. Porém, algumas formas de operação são mais eficientes do que outras dependendo do objetivo geral, dos limitantes de preço, espaço ou qualquer tipo de restrição ambiental ou legal.

Não existe uma forma de operação ótima para operação de sistemas híbridos, mas sim várias, cabendo a cada responsável de projeto uma análise específica para cada caso. Os estudos mais repetidos na bibliografia de acordo com o filtro de ter as tecnologias de conversão dos sistemas híbridos solar-eólico-baterias são listados a seguir.

2.4.1 Custo Crítico do Combustível

Essa estratégia toma o custo de um sistema de mesma capacidade energética operando com um combustível fóssil como *benchmark*. Caso a operação do sistema híbrido custe mais que seu equivalente fóssil, se opta por comprar energia da rede e deixar o sistema em *stand by*. Caso contrário, o sistema híbrido alimenta toda a carga prevista (Marion, 2005).

Esses valores mudam a cada passo de tempo porque o rendimento do gerador diesel muda de acordo com a carga (Çengel, 2012). O mesmo vale para o sistema híbrido, pois a disponibilidade de recursos solares ou eólicos é igualmente variável, portanto a decisão de operação ou não depende do cálculo de uma curva de custo crítico, no qual a decisão é apoiada.

2.4.2 Seguimento de Carga

Nessa estratégia somente as energias renováveis recarregam as baterias e a rede apenas completa alguma diferença que haja entre a carga e a produção (Barley, 1996).

2.4.3 Ciclo de carga do armazenamento

A estratégia de ciclo de recarga é mais adaptada aos sistemas que utilizam principalmente a energia da rede para satisfazer sua carga e a energia de fontes renováveis apenas como atenuador de despesas.

A forma de operação consiste em utilizar a energia da rede nos horários em que ela é mais barata para carregar as baterias e em horários em que a energia é mais cara utilizar a potência gerada das fontes renováveis e armazenada nas baterias nos horários de pico (Barley, 1996).

2.4.4 Loop de Histereses

O principal alvo dessa estratégia é aumentar a vida útil das baterias de chumbo-ácido, que dependem do ponto máximo de recarga e mínimo de descarga. Para isso desde que a bateria atinja um ponto mínimo a carga é satisfeita pela rede de distribuição de energia local. Na situação oposta, a alimentação da bateria é cortada quando ela atinge o limite máximo (Zhou, 2008).

2.5 Indicadores

Para cada sistema energético híbrido existe um conjunto de indicadores que monitoram o seu estado de funcionamento, eles estão diretamente ligados ao sistema ou podem depender de entradas externas ao sistema, como por exemplo, os dados meteorológicos.

As decisões da estratégia de operação são baseadas em índices calculados para cada passo de tempo enquanto o sistema está operando. Eles são basicamente dependentes da carga e do preço de produção de energia, assim o sistema pode alterar seu modo de operação várias vezes ao longo do dia a fim de melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis em função do custo e do atendimento à carga.

2.5.1 Indicadores Meteorológicos

Essa categoria foi dividida em indicadores obtidos diretamente das estações meteorológicas e indicadores calculados. Os dados obtidos diretamente são como clássicos como irradiação, temperatura e velocidade do vento. Os mais importantes no contexto do trabalho são justamente os calculados, que são detalhados futuramente, pois entre outros está incluso o índice de complementaridade, que será pela primeira vez utilizada como índice de tomada de decisão.

2.5.2 Indicadores econômicos

Representam o comportamento das finanças ao longo da vida útil do projeto, levando em conta investimento inicial, custo de manutenção e operação, tempo de retorno, depreciação dos equipamentos e igualmente a perda de rendimentos dos mesmos ao longo do ano. São importantes para indicar a viabilidade, porque a maioria dos projetos visa a obtenção de lucro, com exceção dos que tem um viés social mais expressivo.

2.6 Índices de complementaridade

Os índices de complementaridade mensuram quanto as fontes se completam num dado período.

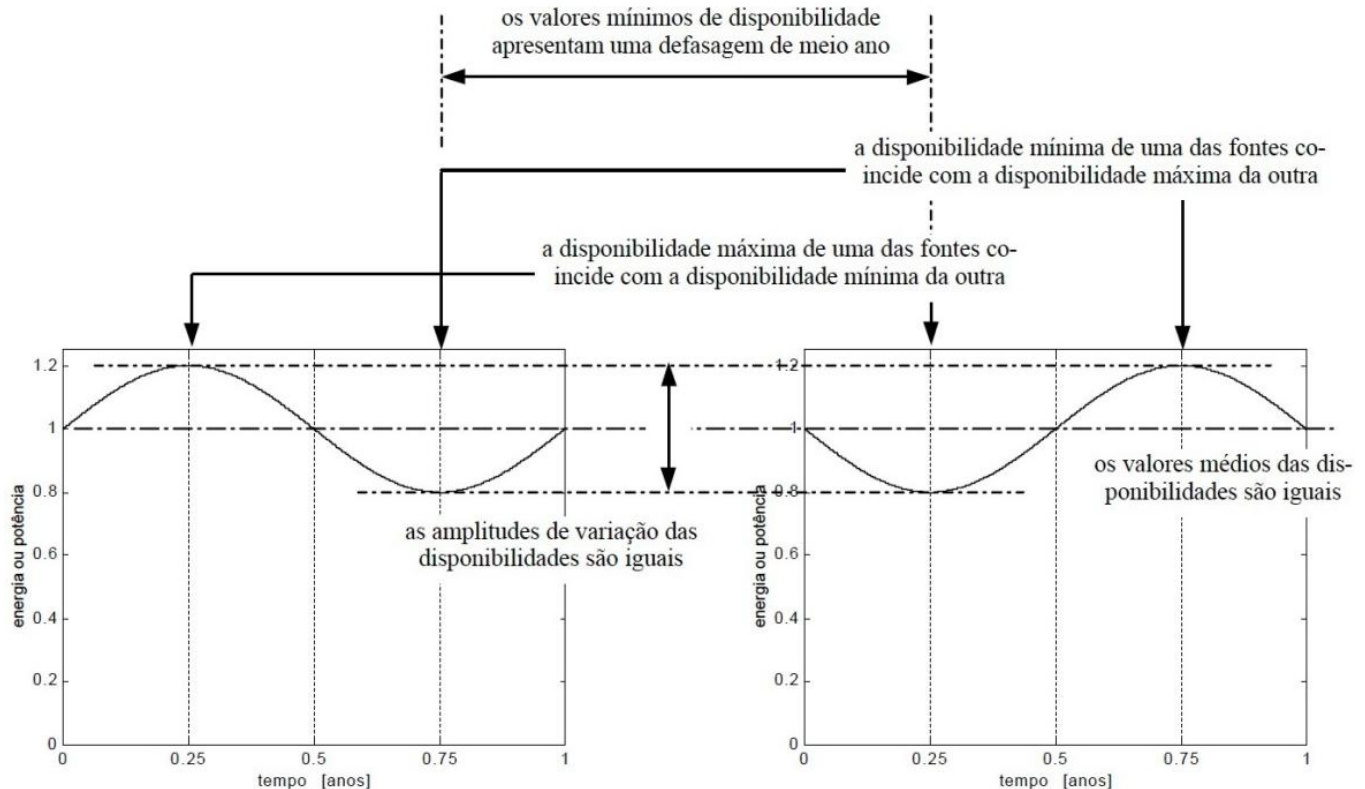


Figura 4. Índices de Complementaridade Ótimos. Fonte: Beluco, 2001.

A Figura 4 mostra duas fontes que são complementares de forma ótima em todos os quesitos, ou seja, a disponibilidade máxima de uma fonte ocorre no mesmo dia em que há disponibilidade mínima de outra e vice-versa. Também as durações de potencial mais alto e mais baixo duram o mesmo tempo e ocorrem em momentos opostos. Simplificando, a complementaridade ótima ocorre quando as fontes seguem funções senoidais opostas, com separação de pontos máximos e mínimos de 0,4.

Todos os cálculos de índices de complementaridade listados a seguir foram efetuados a partir da tese de doutorado do Alexandre Beluco adaptando as variáveis para torná-los representativos ao caso de um sistema híbrido solar-eólico (Beluco, 2001).

2.6.1 Cálculos de índices

O índice de complementaridade foi produzido em 2001 por Beluco em sua tese de doutorado e propõe um índice que quantifica a complementaridade entre

fontes solares e eólicas. Para a elaboração desse trabalho foi feito uma adaptação desses índices trazendo-os para a aplicação entre fontes solares e eólicas no centro-oeste do Brasil.

$$I_c = I_t * I_e \quad (9)$$

I_c = índice de complementaridade;

I_t = complementaridade no tempo;

I_e = complementaridade de disponibilidade.

A equação 10 é composta apenas por números adimensionais, os índices de complementaridade no tempo e de disponibilidade são descritos detalhadamente logo em seguida.

2.6.1.1 Complementaridade no Tempo

Esse índice quantifica o intervalo entre os mínimos de disponibilidade das fontes. Seu valor ótimo é 1, que acontece quando o mínimo de uma fonte ocorre no meio do intervalo e distante meio período do mínimo da outra.

Para calcular o índice de complementaridade no tempo é usada a seguinte equação:

$$I_t = \frac{|dv-ds|}{\sqrt{|Dv-dv||Ds-ds|}} \quad (10)$$

dv = número do dia em que há menor potencial de vento;

ds = número do dia em que há menor potencial de sol;

Dv = número do dia em que há maior potencial de vento;

Ds = número do dia em que há maior potencial de sol.

O número do dia é calculado considerando que o ano começa no dia 1 e termina no dia 365, assim esse valor é a posição que o dia em questão ocupa no ano. Quando os potenciais mínimos e máximos se repetem no ano, escolhe-se o primeiro dia a apresentar o valor.

2.6.1.2 Complementaridade de Disponibilidade

Esse índice avalia os valores médios de cada fonte. A melhor hipótese é quando as duas fontes têm o mesmo valor resultando em 1 e se aproximando de zero quando há diferença entre os valores médios.

$$Ie = 1 - \sqrt{\left(\frac{Ev - Es}{Ev + Es}\right)^2} \quad (11)$$

Ev= potencial eólico no ano [Wh/m²/ano];

Es= potencial solar no ano [Wh/m²/ano].

3 Materiais e Métodos

Para atender o objetivo de utilizar os índices complementares para tomar decisões de operação, inicialmente foi proposto um sistemas híbrido teórico, colocado em Brasília, com estratégia de operação baseada em índices de complementaridade, que posteriormente será testada e comparada com a proposição de um software já reconhecido no mercado para esse fim.

O estudo sobre a utilização de índices de complementaridade de disponibilidade e no tempo como indicadores decisórios foi feito por meio de análise de dados meteorológicos, seguido do cálculo dos mesmos índices.

Depois de propor um perfil de carga representativo, escolher tecnologias de conversão e armazenamento de energia e também os preços praticados no mercado de energia brasileiro o sistema foi simulado utilizando uma ferramenta computacional. Para concluir o estudo foi comparado a proposta aqui exposta com a estratégia adotada pelo HOMER.

3.1 Arquitetura do Sistema Híbrido e seus Componentes

O sistema considerado é composto por um módulo fotovoltaico e um banco de baterias conectados a uma barra de corrente contínua-DC, um conversor que funciona tanto na transformação AC-DC quanto DC-AC e uma turbina eólica, as cargas que devem ser alimentadas e a rede, todas conectadas à barra de corrente alternada-AC, de acordo com a Figura 5 .

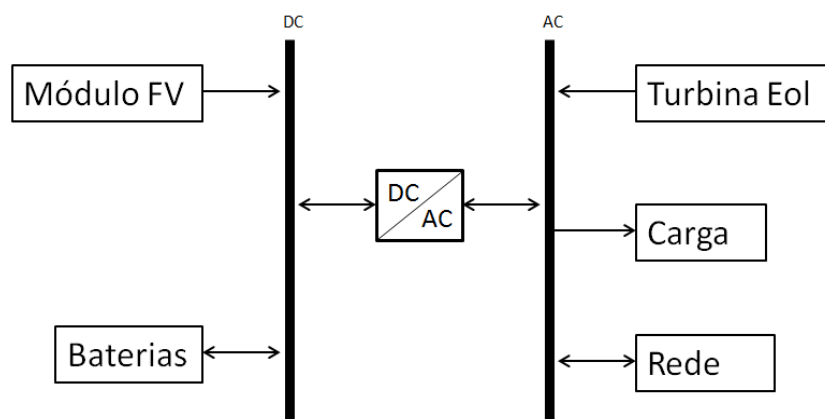


Figura 5. Arquitetura do Sistema Híbrido Considerado.

A representação do sistema da figura acima inclui setas que indicam as possíveis direções que a energia pode circular. Na barra DC o módulo fotovoltaico apenas cede energia ao sistema, diferentemente das baterias que podem carregar ou descarregar. Quanto à barra AC, ela é suporte da turbina eólica e da carga, ambas unidirecionais, a primeira apenas cedendo e a segunda apenas consumindo energia elétrica, a rede representada é o sistema de distribuição local que pode fornecer ou consumir eletricidade do sistema.

3.2 Carga

A carga é um dos fatores limitantes e condicionantes do sistema, porque a função do sistema híbrido é de satisfazê-la sempre. Porém, seu valor específico não é importante para os fins desse trabalho já que o objetivo é propor uma estratégia de operação de sistemas híbridos utilizando índices de complementaridade. Por isso a carga utilizada foi baseada no consumo dos equipamentos mais comuns nas residências do Centro-Oeste, proposta por Menezes, 2014.

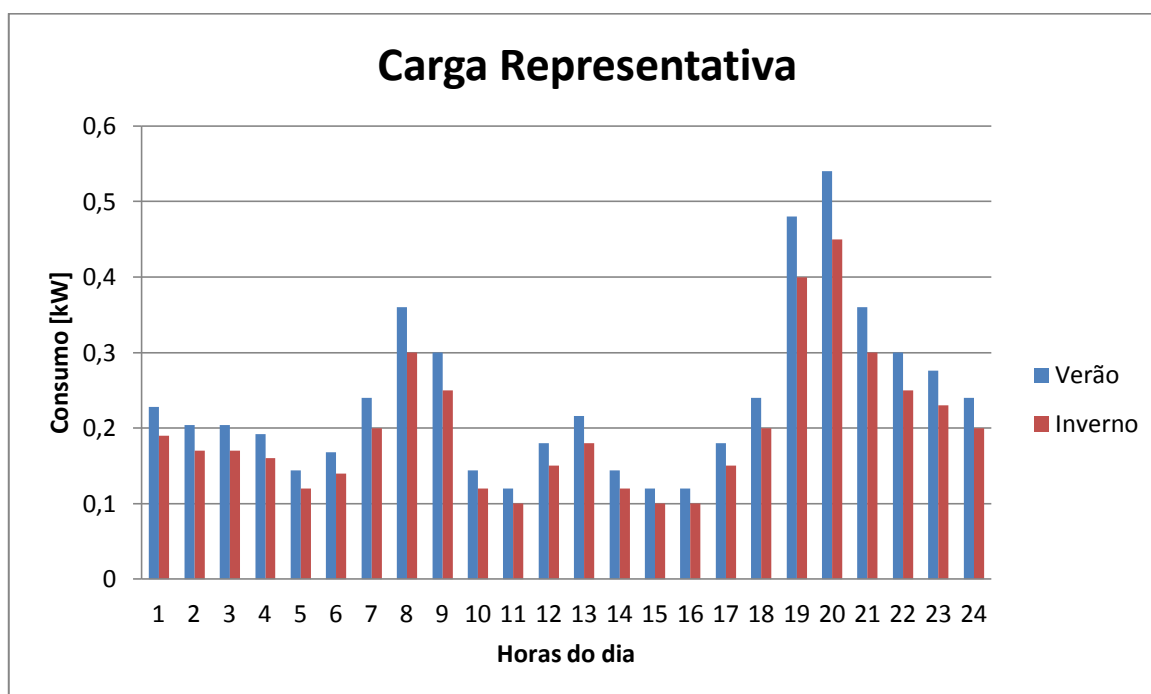


Figura 6. Carga Representativa do consumo no Centro-Oeste

A curva foi feita a partir da reprodução do perfil de consumo (Menezes, 2014) multiplicado por fatores multiplicativos aumentando 15% do consumo nos meses de verão, mas sempre respeitando o mesmo perfil.

3.3 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos quantificam os recursos primários disponíveis para geração de eletricidade.

Existe um esforço internacional com o objetivo de mapear a mudança climática no mundo. Para isso, foi criado um banco internacional de dados meteorológicos o chamado *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN). Um projeto local que contribui para esse banco mundial é o Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), que disponibiliza dados meteorológicos de Brasília mensurados ao passo de tempo de um minuto. A vantagem desses dados é sua uniformização com padrões internacionais.

Para adaptar esses dados ao contexto desse trabalho, foi feito um tratamento utilizando o *Excel* para estruturar o arquivo em um único arquivo todos os dados mensais e o *Matlab* para ler esses dados e transformar a média dos minutos em médias horárias. Posteriormente foi filtrado os dados importantes em uma única matriz com colunas: medição, irradiação global horizontal, velocidade do vento e temperatura e linhas com medições para cada hora do ano.

Essa matriz tem uma linha para cada hora do ano, ou seja, de 1 até 8.760; as colunas representam a irradiação global horizontal em uma região longe de grandes prédios e/ou montanhas; velocidade do vento mensurada a 10m do solo e em m/s e finalmente a temperatura em graus Celsius.

Os dados escolhidos foram do ano de 2013, porém havia um intervalo de inconsistente que foi substituído pelos dados equivalentes do ano anterior. Julgou-se adequada a substituição porque o comportamento das fontes renováveis é sazonal e tende a se repetir ao longo dos anos (Bal, 2014), logo, para os fins aqui necessários, essa alteração não afeta o objetivo final.

3.3.1 Irradiância Solar

A irradiância solar medida pelos dados do Sonda em Brasília está plotada para cada hora do ano na figura abaixo.

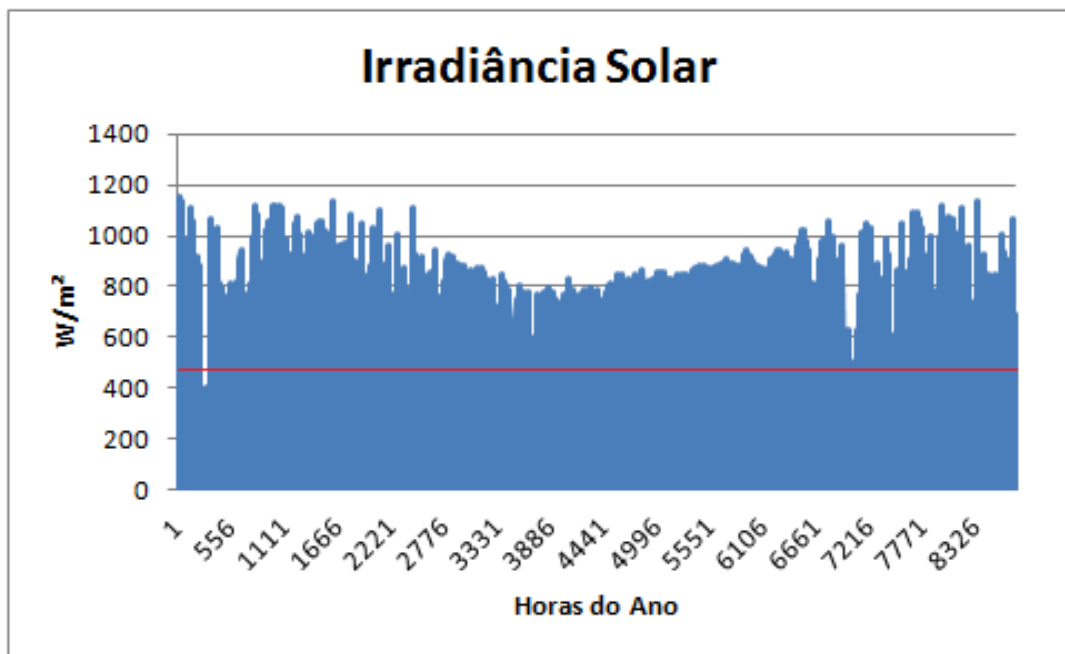


Figura 7. Irradiância Solar em Brasília.

Analisando a Figura 7 é visível o comportamento sazonal da Irradiância Solar, menor no inverno, que acontece no meio do ano, aproximadamente entre as medidas 3331 e 4996 e maior no verão, no começo e final do ano. A diferença entre verão e inverno é pequena porque Brasília é relativamente próxima da linha do Equador, por isso não apresenta grandes variações na Irradiância Solar. A média calculada excluindo-se os zeros é 418,58 W/m², representada na Figura 7 pela linha vermelha.

3.3.2 Velocidade dos Ventos

Se comparada com a região de maiores intensidade de vento do Brasil, principalmente as regiões litorâneas onde a média de vento é 10 m/s (Custódio, 2010), a velocidade dos ventos em Brasília não é muito alta, possuindo uma média de 1,1 m/s e é com a frequência de repetição mostrada no histograma abaixo.

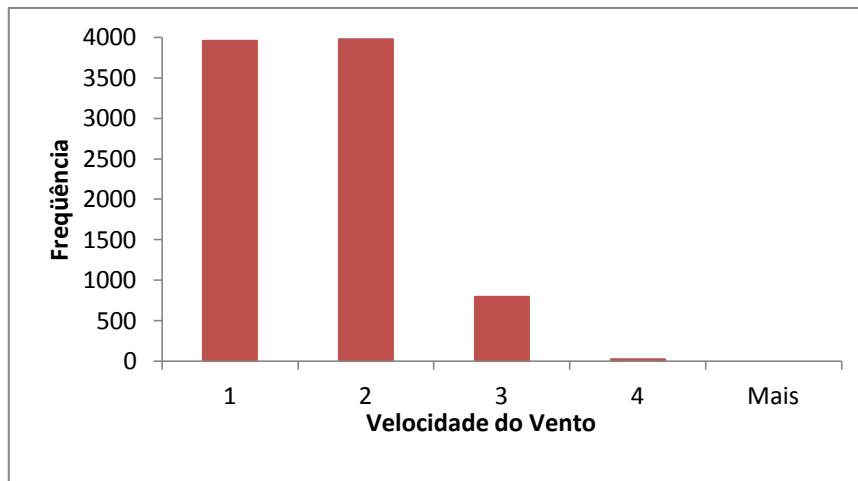


Figura 8. Histograma de velocidade do vento em Brasília

A Figura 8 foi realizada com bases nos dados horários de velocidade do vento, vê-se que a maioria dos dados coletados estão concentrados na velocidade entre 1 e 2 m/s. Lembrando-se de que o ano possui 8.760 horas, calcula-se que em mais 90% as velocidades menores do que 2 m/s repetem.

3.3.3 Comparação entre potenciais Solar e Eólico

Para comparar o potencial Solar e Eólico de Brasília foi feito um gráfico com a soma da quantidade de energia por unidade de área disponibilizado por cada fonte. A unidade foi escolhida assim para excluir a importância do equipamento utilizado porque, nesse primeiro momento visa-se comparar o potencial independente do tipo e tamanho da tecnologia de conversão utilizada.

A área usada para transformação de energia elétrica por fontes fotovoltaicas é a área que as células fotovoltaicas cobrem. Quanto à área das turbinas eólicas de eixo horizontal, é a região varrida pela rotação das pás, que são as utilizadas nesse trabalho.

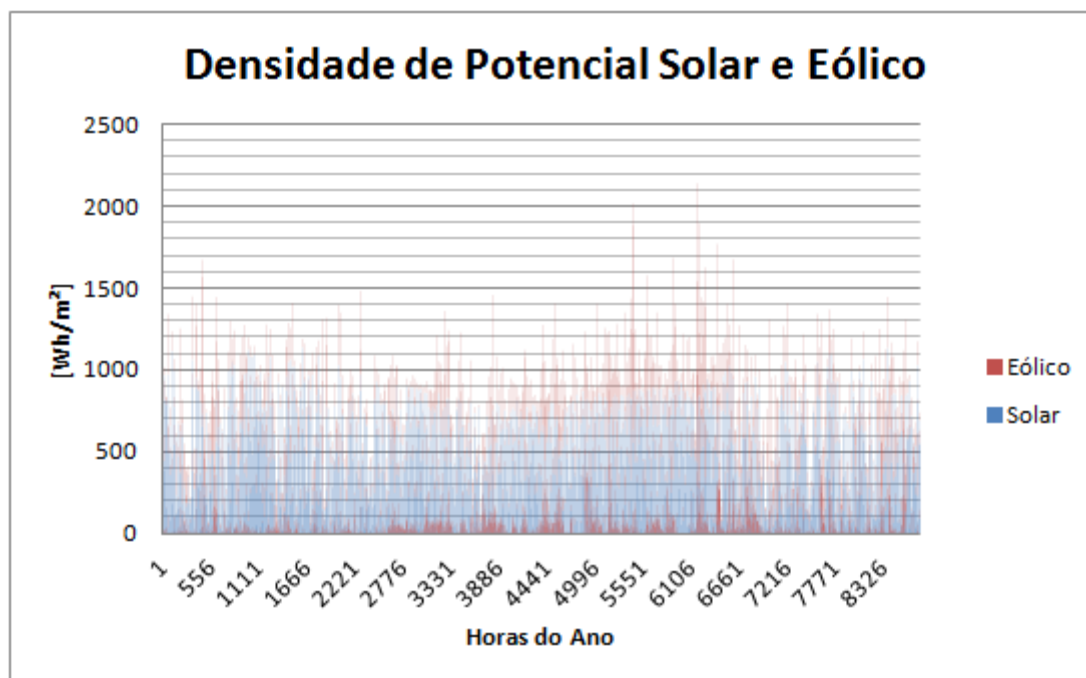


Figura 9. Densidade de Potencial Solar e Eólico de Brasília.

O gráfico da Figura 9 mostra a sobreposição da quantidade de energia por unidade de área disponibilizado por cada fonte ao longo do ano. Nesse gráfico é possível identificar a complementaridade ao longo do ano, porque as fontes atuando juntas suavizam picos de máximo e mínimo ao longo do ano.

Para o julgamento visual da existência de complementaridade entre as fontes na escala de tempo diária, foi elaborado um gráfico da média diária normalizada pelo pico máximo de cada fonte, exposta na figura a seguir.

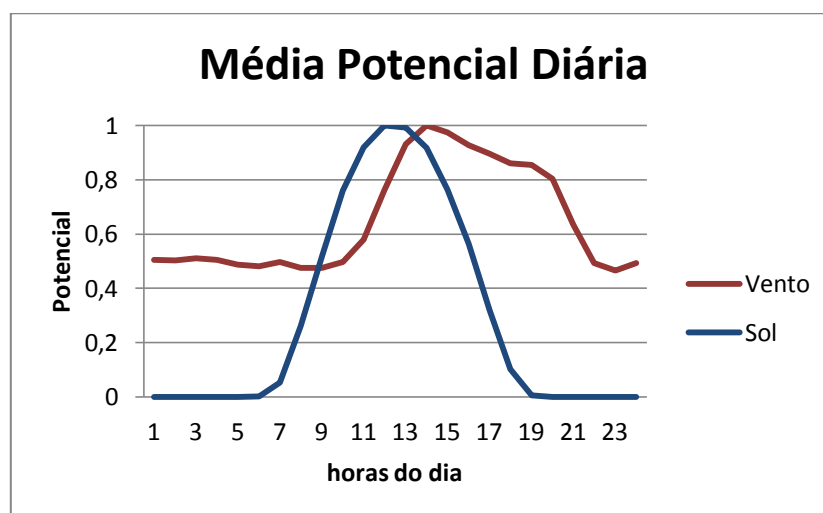


Figura 10. Média Diária do Potencial Solar e Eólico.

A partir da análise da figura 10 pode-se ver que a complementaridade também existe dentro dos dias e é especialmente importante no período da noite, momento em que o Sol já se pôs, mas ainda há grande demanda energética, como mostrado na Figura 6, mas a energia eólica pode ser usada como principal fonte nesse período.

3.4 Cálculo dos Índices de Complementaridade

Os índices de complementaridade são importantíssimos no contexto do presente trabalho e os aqui apresentados foram calculados com os dados meteorológicos apresentados anteriormente e serão usados nos próximos tópicos.

3.4.1 Índice de complementaridade no tempo [It]

Os índices de complementaridade no tempo, como exposto no item 2.6 não ajudam, pois eles são únicos para um dado ano. Entretanto, o objetivo desse trabalho é usar os índices em operação de sistemas energéticos multivetores, a complementaridade anual deixa de ser significativa. Por isso tal índice foi adaptado para o intervalo horário e os dias de máximo e mínimo são substituídos pelo número do minuto e adotado como ponto de ótimo regiões onde ele seja mais baixo possível para evitar constantes adaptações do sistema. Assim, a Equação 8 se torna:

$$It = \frac{|mv-ms|}{\sqrt{|Mv-mv||Ms-ms|}} \quad (12)$$

mv = número do minuto em que há menor potencial de vento;

ms = número do minuto em que há menor potencial de sol;

Mv = número do minuto em que há maior potencial de vento;

Ms = número do minuto em que há maior potencial de sol.

Esse índice foi calculado e o resultado está na figura 11, mostrando seu comportamento no decorrer do ano 2013.

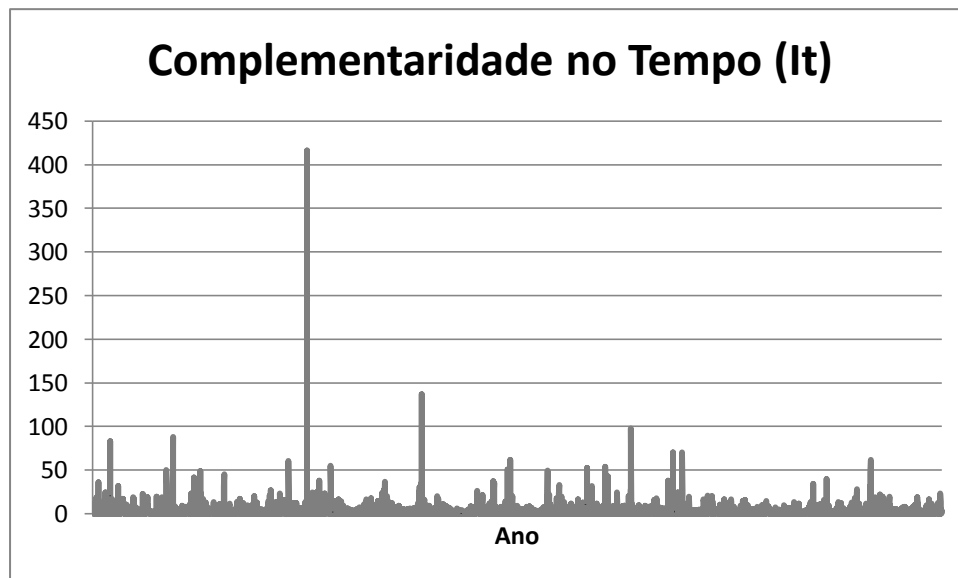


Figura 11. Complementaridade no Tempo a longo do ano

O melhor intervalo de operação seria nos momentos que pontos de máximo e mínimo estejam longe entre si, essa situação evita a constante adaptação do sistema, economizando energia e evitando desgastes.

O intervalo de operação ótimo é representado por baixos índices de complementaridade, pois quanto menores os índices maior deve ser o denominador da Equação 12, que é a média geométrica entre o máximo e mínimo de cada fonte.

Na Figura 11 observam-se poucos picos ao longo do ano, quer dizer que na maior parte do tempo as fontes apresentam baixos índices de complementaridade do tempo, que é a característica buscada.

3.4.2 Índice de complementaridade de disponibilidade [Ie]

Esse índice foi calculado utilizando a Equação 11 e é o mais relevante no processo de escolha da estratégia de operação do sistema. A figura abaixo mostra o comportamento do índice Ie para cada hora do ano.

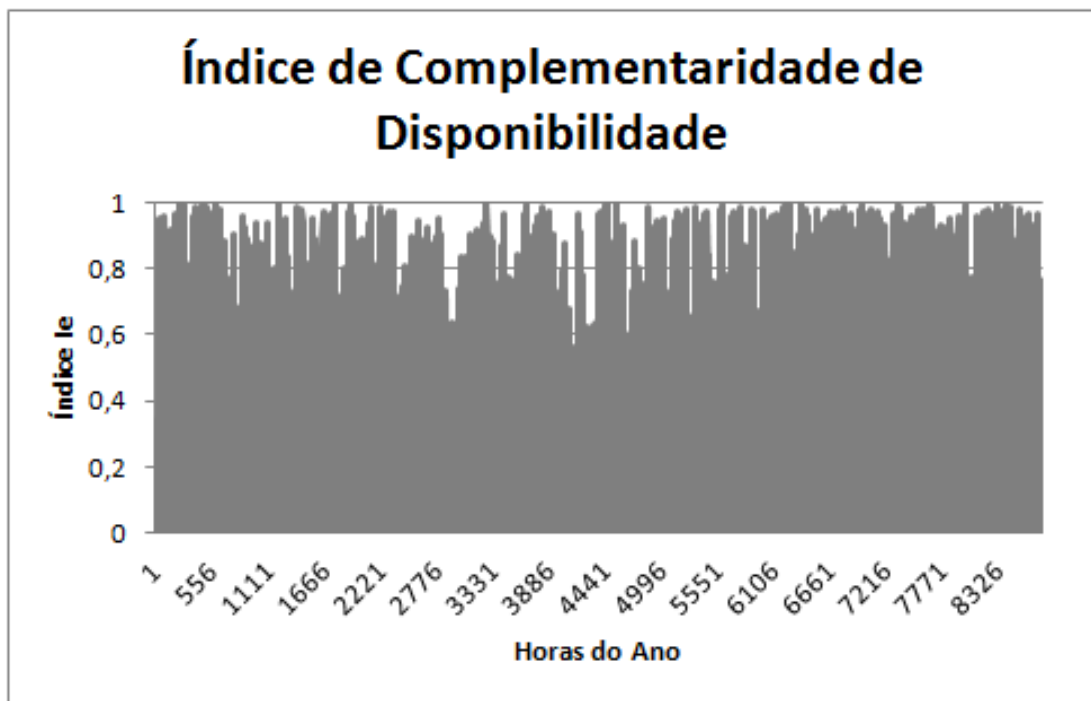


Figura 12. Comparação entre Índice de Complementaridade de disponibilidade, potencial solar e eólico.

Pode-se interpretar o gráfico da Figura 12 pensando que, quanto mais próximo de 1 o I_e , mais complementares as fontes são. Esse tipo de complementaridade mostra que quando uma fonte tem mais energia a outra tem menos e elas vão se completando ao longo do ano, portanto mais adequado é a utilização do sistema híbrido. A principal conclusão dessa figura é que as fontes são complementares na maior parte das horas do ano.

3.5 Estratégia de Operação baseada em Índices de Complementaridade

O objetivo dessa estratégia é explorar o caráter complementar de fontes renováveis. Para isso, os índices de complementaridade devem ser calculados no momento anterior da tomada de decisão.

Como foi discutido no item 2.6.1.1, os índices de complementaridade no tempo foram negligenciados na estratégia aqui proposta porque na maior parte do ano eles são baixos, ou seja, ótimos para a operação do sistema. Então acrescentar uma etapa para compará-los e agregá-los como decisivos retornaria uma dificuldade desnecessária porque não resultaria em nenhuma vantagem operativa ao sistema.

O sistema tem uma estação meteorológica auxiliar conectada ao sistema de controle, possibilitando a previsibilidade das fontes primárias de energia por meio do cálculo do I_e . A segunda parte dessa estratégia está baseada naquela citada em 2.4.4, com limites máximos e mínimos de níveis do banco de baterias e os respeitando na hora de decidir sobre a compra energia da rede de distribuição. Assim, a estratégia de operação do sistema proposta nesse trabalho tendo como base I_e será:

- i. Num primeiro momento I_e é calculado e comparado com um número de decisão é estipulado, no caso 0,33;
- ii. Se o resultado for menor, será calculado quanto de potência cada tecnologia gerará e qual será a maior delas. Nesse caso apenas a maior alimentará o sistema;
- iii. Se o resultado for maior, não importa o potencial das fontes separadamente, ambas alimentarão o sistema.
- iv. Num segundo momento a carga e a produção de energia primária são comparadas;
- v. Se houver déficit de energia, a potência máxima de descarga e o limite do estado de carga do banco de baterias são medidos e se a bateria não puder alimentá-la, o sistema compra energia da rede;
- vi. Se houver um excesso de energia, a potência máxima de recarga do banco de baterias e o limite do estado de carga são medidos e se todo o excesso de energia não puder ser absorvido ele é vendido para a rede.

A Figura 13 mostra um diagrama essa estratégia de forma sucinta num diagrama de bloco a fim de facilitar a visualização do processo de forma global e a Figura 14 mostra o algoritmo completo de solução aqui proposta.

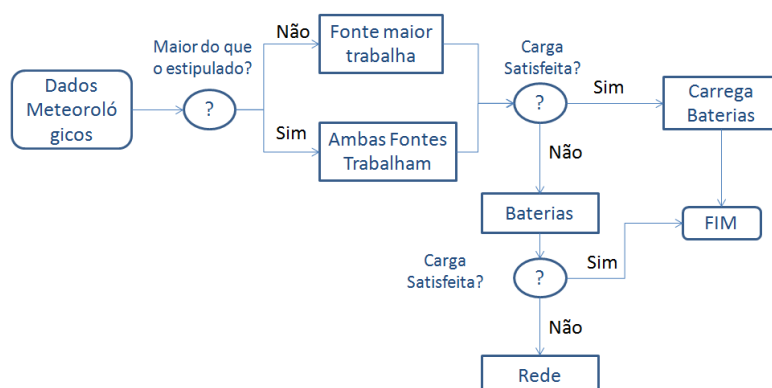


Figura 13. Síntese da estratégia

O processo dessa estratégia de operação está detalhado na página seguinte, Figura 14, mostrando as possibilidades de decisão para sempre satisfazer a carga de um sistema híbrido solar-eólico-armazenagem aqui proposto.

O principal diferencial dessa estratégia consiste em diminuir o tempo de operação das tecnologias de conversão quando não há um índice de complementaridade satisfatório, assim diminui-se o custo de operação e manutenção e aumenta-se a vida útil do sistema.

Por meio de análises dos dados meteorológicos e comparação com o estudo comparativo entre fontes hídrica e eólica (Beluco, 2001), o valor estipulado para considerar as fontes complementares foi 0,33. Em outras palavras, o sistema híbrido implementado considerará as fontes complementares e consequentemente acionará ambas concomitantemente quando o le for maior ou igual 33% do valor máximo.

A estratégia de operação é interpretada como um processo e é modelada como um, seguindo o conjunto de normas que regulamentam a modelagem de processos muito usada na engenharia de software. A elaboração do modelo da página seguinte, a figura 13 foi feita com a notação BPMN (*Business Process Model and Notation*) e um software livre, o Bizagi que usa essa notação para modelar e simular processos (Godart, 2009 e Bizagi, 2014).

Os nomes na vertical dos retângulos externos são os atores dos subprocessos, ou seja, os responsáveis pelo acontecimento, no caso a estação meteorológica e o próprio sistema híbrido.

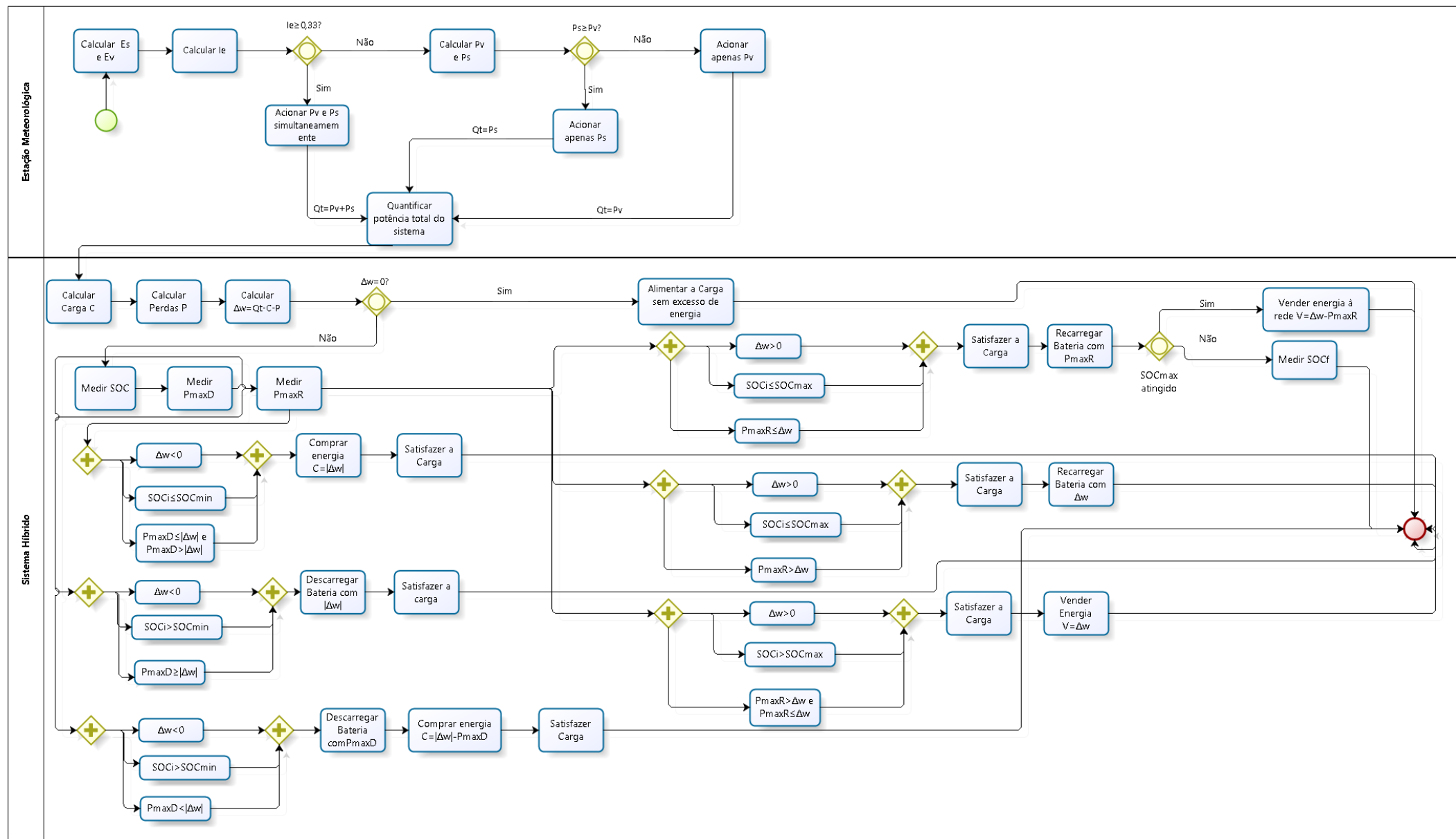


Figura 14. Estratégia de Operação baseada em índices de complementaridade. Fonte: Autora.

Legenda:

- Q_t = produção total do sistema [kW];
- C = carga [kW];
- P =perdas [kW];
- $\Delta w = Q_t - P - C$ [kW];
- SOC_i = State of Charge, quantidade de energia armazenada no banco de Baterias no começo do passo de tempo [%];
- SOC_f = State of Charge no final do passo [%];
- SOC_{max} = máxima quantidade de energia que o banco de baterias pode aguentar sem danar sua estrutura [%];
- SOC_{min} = mínima quantidade de energia que o banco de baterias pode aguentar sem danar sua estrutura [%];
- P_{maxD} = potência máxima que a Bateria pode descarregar [kW];
- P_{maxR} = potência máxima que a Bateria pode recarregar [kW];
- V = energia vendida à rede [kW];
- C = energia comprada de rede [kW].

A produção total do sistema Q_t é a quantidade de energia produzida pelas fontes renováveis e idealmente serão as suficientes para satisfazer a carga e as perdas. As perdas são provenientes majoritariamente do conversor AC-DC, ignorando as perdas dos fios e efeito joule, sendo assim é possível estimar as perdas de antemão porque elas estarão ligadas à potência da carga.

O cálculo de Δw é determinante para saber se o sistema está trabalhando numa situação de déficit ou sobra de energia e assim escolher qual o caminho deve ser escolhido para satisfazer a carga. Caso esse cálculo mostre que falta energia, então o SOC_i é medido para saber se o banco de baterias tem a energia que a carga precisa. A importância do SOC_f é no caso cálculo, quando há sobra de energia e o sistema precisa carregar a bateria. As operações com a bateria (carga e descarga) devem respeitar igualmente os limites operacionais das mesmas, como a P_{maxR} e a P_{maxD} e também os mínimos e máximos de energia guardada para não afetar a vida útil delas.

3.6 Módulo fotovoltaico

O dimensionamento ótimo do módulo fotovoltaico é calculado a partir dos parâmetros das equações Equação 1 e Equação 2 que estão expostos no quadro abaixo.

Quadro 1. Parâmetros do módulo fotovoltaico.

Potência pico [kW]	0,25
Fator de perdas [%]	80
Refletância do solo [%]	20
Coeficiente de perdas pela temperatura [%/°C]	0,5
Temperatura NOTC [°C]	47
Eficiência STC [%]	15,3

Os parâmetros são relacionados às características físicas do módulo a ser instalado, os valores de refletância assumida foi o proposto no software utilizado para a simulação, todas as outras características são disponibilizadas pelo fabricante (AVP, 2014).

Igualmente importante no dimensionamento e escolha de estratégia de operação, por isso os critérios econômicos estão listados no quadro abaixo.

Quadro 2. Parâmetros Econômicos de módulos Fotovoltaicos

Preço de cada módulo [R\$/Potência Pico]	800
Troca de módulo [R\$/Potência Pico]	800
Operação e Manutenção [R\$/ano]	60

O Quadro 2 foi feito com base nos dados de preço do fabricante de módulos fotovoltaicos.

3.7 Turbina Eólica

A velocidade média dos ventos na região do Distrito Federal são baixas, então a turbina proposta permite a exploração desse tipo de vento, possuindo potência máxima de 2,4 kW.

Quadro 3. Parâmetros econômicos da Turbina Eólica

Preço de cada turbina [R\$/turbina]	44.900
Troca de turbina [R\$/turbina]	44.900
Operação e Manutenção [R\$/ano]	80

O quadro 3 foi novamente feito com base nos preços praticados pelo fabricante de turbinas eólicas *Skystream*.

3.8 Rede de distribuição de eletricidade

A tarifa considerada foi a *net metering*, ou seja, de compensação de custos. Quando há maior produção pelo sistema híbrido a energia injetada na rede é contabilizada como créditos que são liquidados mensalmente, caso haja acúmulo ou déficit eles são compensados no mês seguinte. Assim houve apenas diferenciação entre tarifas de ponta e fora de ponta, com mesmo valor para compra e venda de energia, como mostrado no quadro abaixo (EPE, 2012).

Quadro 4. Tarifas Ponta e Fora consideradas

Tarifa Ponta [R\$/kWh]	0,245
Tarifa Fora Ponta [R\$/kWh]	0,152

As tarifas de ponta são mais caras porque correspondem ao período do dia em que há maior consumo de energia, ou seja, exige-se mais da rede de distribuição e das fontes geradoras. Por isso o valor pago é mais alto, para coibir a demanda nesse período. Nesse trabalho foi considerado como ponta os intervalos entre 7h e 8h da manhã e entre 18h e 20h em dias de semana. O período fora de ponta são todas as outras horas do dia e finais de semana.

Sabe-se ainda que há diferenças entre tarifas em relação à época do ano (período seco e úmido) mas essa tarifação foi negligenciada deliberadamente por acrescentar complexidade ao problema não agregando valor na mesma proporção às conclusões do trabalho.

3.9 Simulação no *Homer*

Homer é um software inicialmente desenvolvido pelo NREL (Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos) e posteriormente a *Homer Energy* assumiu o desenvolvimento e comercialização do software. Ele é usado para simulação de operação e otimização de dimensionamento de sistemas híbridos.

Para melhorar o dimensionamento do sistema e comparar as estratégias de operação usuais com a estratégia baseada nos índices de complementaridade, foi usada a versão gratuita do *Homer*.

As simulações foram feitas mantendo exatamente as mesmas tecnologias de conversão, intervalo de valores para otimização e parâmetros econômicos.

Inicialmente o programa foi rodado com os dados meteorológicos originais utilizando a estratégia Ciclo de Carga (CC) e Seguimento de Carga (LF). Depois, os dados de entrada de irradiação solar e incidência de vento foram modificados de acordo com as regras estabelecidas no item 3.5, para que assim as simulações respeitassem a estratégia proposta nesse trabalho.

3.9.1 Simulação com a estratégia CC e LF

A simulação foi feita com os dados expostos nas seções 3.6, 3.7 e 3.8. Não há diferença entre os resultados com estratégia CC e LF porque o sistema está conectado à rede e não há geradores. Logo ambas estratégias funcionam igualmente, como já foi abordado no tópico relacionados às estratégias mais comuns de operação de sistemas híbridos.

3.9.1.1 Dados de entrada

A primeira parte da simulação consiste em entrada de disponibilidade energética das fontes, carga que deve ser satisfeita, preços e equipamentos de conversão, disponibilidade de recursos, taxa de retorno esperado. As figuras seguintes mostram os principais dados de entrada.

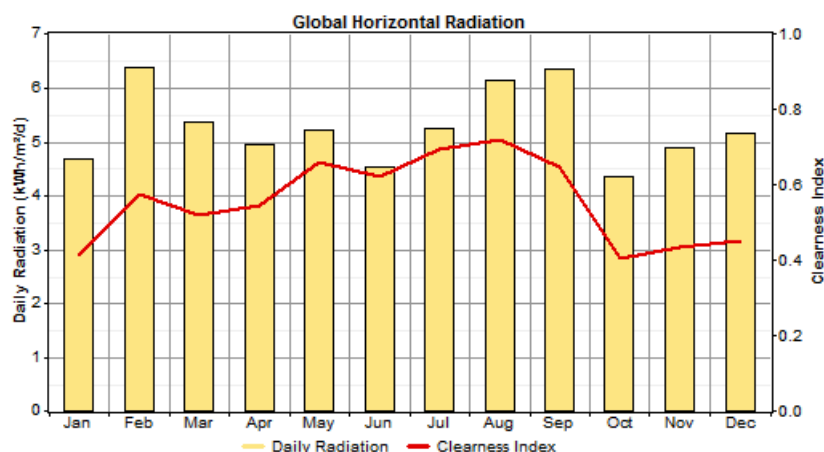


Figura 15. Radiação Média Diária e Índice de Claridade

O gráfico da Figura 15 mostra a média diária de radiação global horizontal nas colunas amarelas e a linha vermelha representa o índices de claridade, calculado automaticamente pelo Homer a partir das coordenadas geográficas fornecidas e a disponibilidade energética da fonte solar. Esses índices mostram quão limpo está o céu, basicamente a quantidade de nuvens que servem como obstáculos ao longo dos meses do ano.

A próxima figura mostra a disponibilidade da fonte eólica.

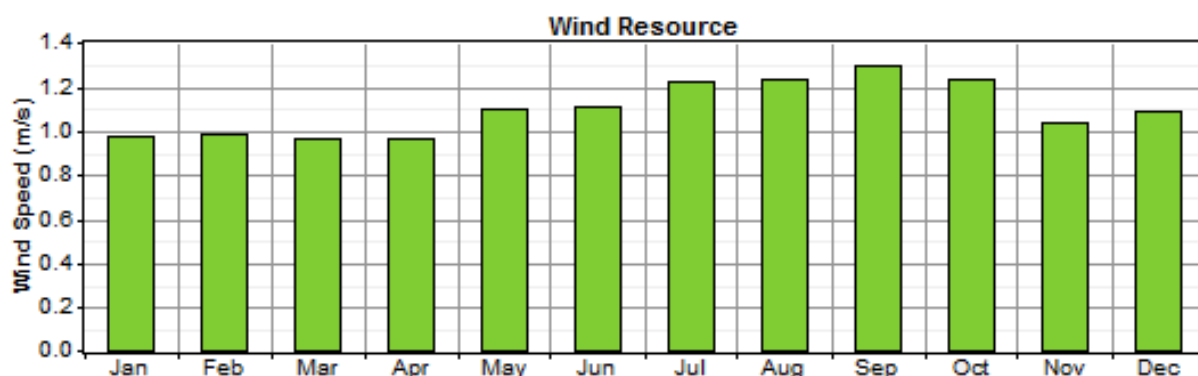


Figura 16. Potencial Eólico

Os dados eólicos são simplesmente a velocidade do vento porque para pequenas gerações a direção do vento não provoca resultados diferentes.

Na figura seguinte está a distribuição das tarifas da rede ao longo do ano.

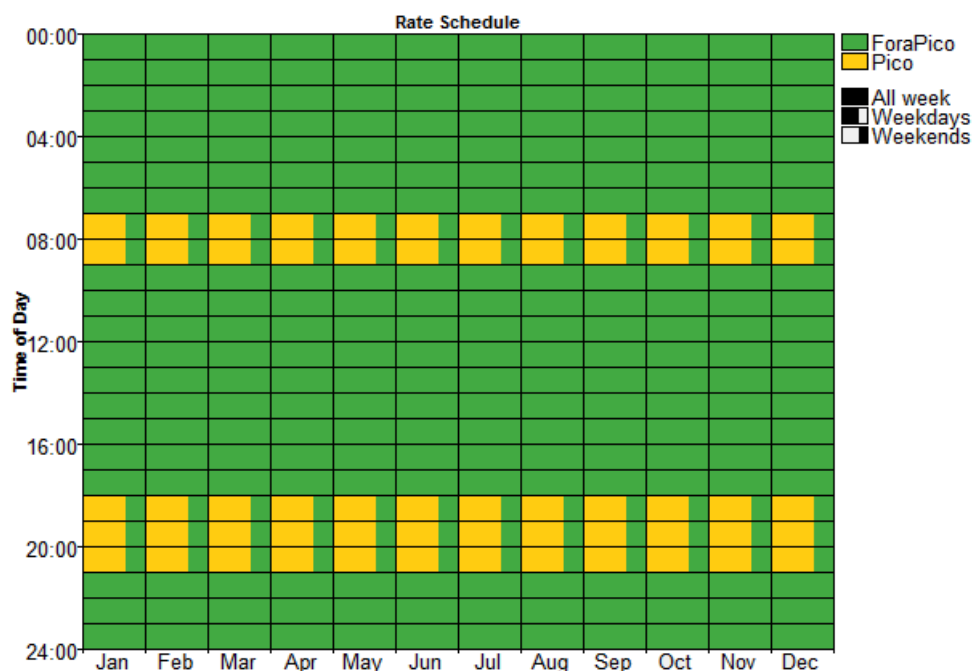


Figura 17. Distribuição de tarifas de compra e venda de energia da rede

Os horário de pico estão representados em amarelo com diferenciação entre dias de semana e de finais de semana.

A próxima figura sintetiza os parâmetros econômicos utilizados nessa simulação como taxa de juros e tempo do empreendimento.

Annual real interest rate (%)	<input type="text" value="6"/>	{.}
Project lifetime (years)	<input type="text" value="20"/>	{.}
System fixed capital cost (\$)	<input type="text" value="0"/>	{.}
System fixed O&M cost (\$/yr)	<input type="text" value="0"/>	{.}
Capacity shortage penalty (\$/kWh)	<input type="text" value="0"/>	{.}

Figura 18. Parâmetros Econômicos *Homer*

O primeiro retângulo foi considerado como a taxa de inflação média anual, aproximada pelos índices IPCA da fundação Getúlio Vargas, o tempo de vida do projeto considerado foi de 20 anos, mais ou menos igual às vidas úteis dos equipamentos.

Os custos fixos foram considerados zero porque foi levado em conta apenas o custo de operação e manutenção de cada tecnologia de conversão separadamente.

Não foi considerada multa por não satisfazer a carga, o último retângulo, por que o interesse de satisfação da carga é do próprio gerenciador do sistema já que o serviço não é prestado a um terceiro.

3.9.2 Simulação com estratégia baseada em índices de complementaridade

A fim de levar o *Homer* a operar com a estratégia que é proposta nesse trabalho, foi calculado o *le* a cada hora do ano e quando o resultado era maior ou igual a 0,33 a fonte de menor potencial era zerada e a de maior continuava igual, gerando assim um novo arquivo de recursos solar e eólico com zeros atribuídos às fontes de menor disponibilidade quando não há complementaridade.

A diferença mais marcante foi nos dados de entrada entre as simulações foi nos recursos energéticos solares, todos os outros dados de entrada permaneceram inalterados. Assim as próximas figuras mostram os novos potenciais considerados.

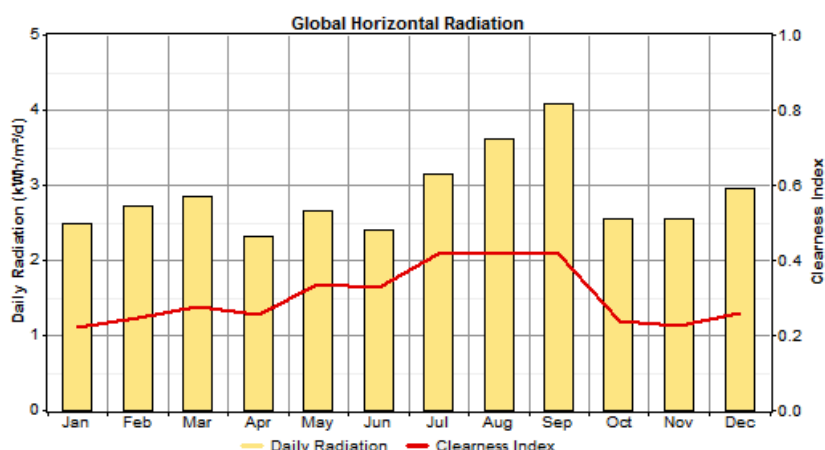


Figura 19. Disponibilidade Solar Adaptada

Ao comparar a Figura 15 e a Figura 19 observa-se que a segunda possui valores de radiação diária muito mais baixos. Porém isso não representa menores picos de disponibilidade energética para produção fotovoltaica porque a média foi feita levando em contas os zeros acrescentados como descrito no começo da seção. Em outras palavras, quando as fontes são complementares ou a disponibilidade solar é maior do que a eólica, o valor da radiação solar é permanece inalterado. A mesma análise é válida gráfica de disponibilidade eólica.

Essas considerações podem ser feitas porque a produção de eletricidade é feita a cada hora, logo nas horas em que a disponibilidade de um recurso energético foi zerada, a outra foi usada para produzir eletricidade.

O gráfico referente aos dados de entrada modificados relativo à fonte eólica não foi acrescentado porque ele não apresenta diferença visível em comparação ao anterior. Isso ocorreu porque na maior parte das vezes em que a complementaridade não atingiu um índice satisfatório. A fonte eólica era a mais intensa, portanto não foi zerada, mantendo a mesma forma do gráfico de distribuição das velocidades do vento ao longo do ano.

4 **Resultados**

Os resultados apresentam a comparação entre as simulações com estratégias de operações diferentes.

A figura abaixo mostra a configuração ótima proposta pelo *Homer*, com a potência instalada de módulo fotovoltaico, turbina eólica, conexão com a rede e custos de investimento, custos de operação por ano, o valor presente do capital investido, após os 20 anos de projeto e finalmente o COE que significa quanto cada kWh de energia produzida pelo sistema híbrido proposto vai custar.

					PV (kW)	sky	CP610...	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kW...)	Ren. Frac.
					0.25	1	1	1.5	CC	1000	\$ 52,844	215	\$ 55,314	2.338	0.72

Figura 20. Dimensionamento Ótimo CC

A figura 20 mostra a potência de cada fonte, como resultado da otimização, a quantidade de baterias, o tamanho do conversor, a potência disponibilizada pela rede de distribuição, o capital inicial, o custo anual de operação, o valor presente líquido (NPC) o custo por kWh produzido e a fração de energia renovável utilizada no sistema, nesse caso a porcentagem de energia que não vem da rede.

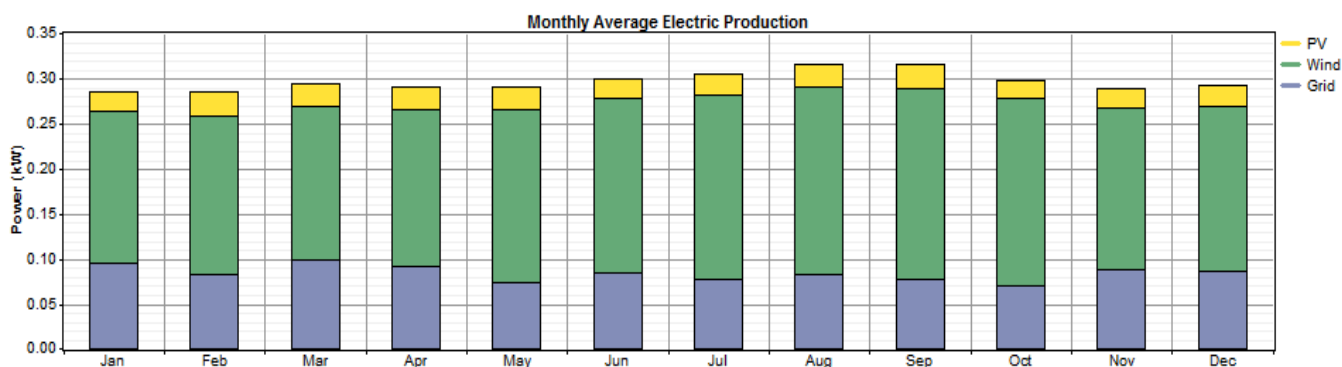


Figura 21. Produção de Eletricidade por fonte CC

Analisando o gráfico acima se constata que a maior parte da energia vem das fontes disponíveis no sistema híbrido, seja fotovoltaica (PV) ou Eólica (Wind). A parte azul das colunas mostra a energia fornecida pela rede (Grid).

Para tornar mais claro a quantidade de energia vendida e comprada da rede, o quadro abaixo foi anexado, comparando a quantidade de energia comprada e vendida.

Quadro 5. Compra e Vendas de Energia da Rede de Distribuição

Month	Energy	Energy	Net	Peak	Energy	Demand
	Purchased	Sold	Purchases	Demand	Charge	Charge
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kW)	(\$)	(\$)
Jan	71	37	34	1	8	0
Feb	55	38	17	1	5	0
Mar	74	37	37	1	8	0
Apr	66	37	30	1	7	0
May	55	45	10	1	4	0
Jun	61	42	19	1	5	0
Jul	57	52	5	1	3	0
Aug	62	49	13	1	4	0
Sep	55	54	1	1	2	0
Oct	52	47	4	1	3	0
Nov	63	40	23	1	6	0
Dec	64	42	22	1	5	0
Annual	734	520	214	1	59	0

No quadro 5, estão dispostos a quantidade de energia comprada, vendida, compras líquidas, pico de demanda e taxa paga para compra de energia na rede e para venda.

O software *Homer* também permite a exportação de todos os valores calculados a cada passo de tempo, permitindo assim uma exploração dos resultados mais profunda e direcionada aos resultados que esse trabalho busca comprovar.

Como o *Homer* considera os custos de operação e manutenção anuais, os resultados oferecidos pelo próprio software não mostraram resultados interessantes

ao que se busca demonstrar. Então os dados calculados pelo Homer foram exportados e com o auxílio do Excel foi calculado os valores da tabela a seguir.

Estratégia	Ciclo de Carga		Índices de Complementaridade	
	Sol	Vento	Sol	Vento
Dados anuais				
Horas de funcionamento [h/ano]	3050	8707	1715	8501
Custo de funcionamento [R\$/ano]	17,41	79,52	9,79	77,64

Tabela 1. Dados anuais comparativos entre fontes e estratégias

A tabela acima mostra a diferença entre a quantidade de horas de funcionamento de cada fonte em cada estratégia ao longo do ano. Observa-se uma pequena diferença porque as fontes são frequentemente complementares, por isso funcionam concomitantemente durante a maior parte do ano.

Se por um lado consegue-se uma redução da quantidade de horas de funcionamento e consequentemente uma redução do preço de operação e manutenção. Por outro, se torna necessária mais compra de energia da rede porque não houve alteração na carga e ela ainda deve ser satisfeita como prioridade do sistema.

Portanto tal estratégia é mais vantajosa para sistemas híbridos de grande porte porque nesses casos os valores de operação e manutenção são mais representativos no total. Também se aplica caso o local de implantação não haja complementaridade tão acentuada, assim a alternância entre operação de uma ou outra fonte ocorrerá com mais frequência.

5 Conclusão

Após a revisão bibliográfica sobre as tecnologias disponíveis para implementação de sistemas híbridos conclui-se que há uma variedade grande de tecnologias de conversão de energia, também que elas têm um certo grau de maturidade e concordância de diversos autores sobre a modelagem matemática de previsão de produção de energia. A dificuldade está concentrada na previsibilidade das fontes energéticas renováveis, porém, essa dificuldade pode ser compensada com a combinação de várias fontes em sistemas híbridos para geração de eletricidade.

Os índices de complementaridade é uma boa forma de estimar o potencial para geração de eletricidade de uma região, eles foram inicialmente propostos para fontes hidráulicas e eólicas, mas se mostraram igualmente representativos para fontes solares e eólicas. Levanta-se a hipótese de que ele pode estimar bem o nível de complementaridade em quaisquer fontes intermitentes dependentes da natureza, mas essa conclusão precisa ser alvo de estudos mais específicos.

No caso específico desse caso de estudo, os índices de complementaridade no tempo não foram importantes porque eles estavam quase sempre em torno do ponto ótimo esperado. Assim, o desgaste computacional em calculá-lo a cada passo de tempo e levá-lo em conta para decidir o caminho a ser tomado para satisfazer a carga não se justificavam.

A estratégia de operação de sistemas híbridos para geração de eletricidade baseada em índices de complementaridade se mostrou eficaz, mas em condições específicas. O caso de estudo aqui apresentado levou em conta uma região onde foi comprovada complementaridade entre as fontes, por isso já se era esperado que os resultados fossem aproximados. Entretanto, em regiões onde há menores índices de complementaridade pode-se chegar a grandes níveis de economia, também se espera melhores resultados em sistemas de maior porte, onde uma hora de economia em manutenção significa grandes parcelas de dinheiro.

A utilização do software *Homer* mostrou-se útil, porém com limitações, sendo necessárias alterações de metodologia para usá-lo com a finalidade de buscar as conclusões sobre a estratégia de operação baseada em índices de complementaridade.

6 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pode-se testar a importância da complementaridade no tempo juntamente com a complementaridade de disponibilidade como bases para a estratégia de operação do sistema. Também o teste dessa estratégia com dados meteorológicos diferentes em situações com baixas complementaridades e altas.

Pode ser interessante o cálculo dos índices de complementaridade entre fontes diferentes, inclusive com mais de duas, para ver se ele ainda é representativo.

Outra forma de explorar esse assunto seria quantificar o ganho em vida útil das tecnologias de conversão e do banco de baterias quando se diminui suas horas de funcionamento graças à estratégia de operação de sistemas híbridos baseada em índices de complementaridade.

7 Bibliografia

1. Bal, Jean-Louis, and Bernard Chabot. "Les Énergies Renouvelables. État de L'art et Perspectives de Développement." *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 333, no. 12 [December 31, 2001]: 827–34. doi:10.1016/S1251-8050[01]01720-7.
2. Guinot, B. "Evaluation multicritère des technologies de stockage couplées aux énergies renouvelable: conception et réalisation de la plateforme ODYSSEY pour l'optimisation du dimensionnement et de la gestion de l'énergie". Tese de doutorado da Universidade de Grenoble, 2013.
3. Reddy, K. S., Madhusudan Kumar, T. K. Mallick, H. Sharon, and S. Lokeswaran. "A Review of Integration, Control, Communication and Metering [ICCM] of Renewable Energy Based Smart Grid." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 [October 2014]: 180–92. doi:10.1016/j.rser.2014.05.049.
4. Hinrichs, Roger. "Energia e Meio Ambiente". 4ª ed. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2004.
5. Documento de ajuda do SAM, software livre de otimização de sistemas energéticos, disponível em: <https://sam.nrel.gov/>. Acessado em: 30/08/2014.
6. Marion, B.; Adelstein, J.; Boyle, K.; Hayden, H.; Hammond, B.; Fletcher, T.; Canada, B.; Narang, D.; Shugar, D.; Wenger, H.; Kimber, A.; Mitchell, L.; Rich, G.; Townsend, T. [2005]. "Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems." 9 pp.; NREL Report No. CP-520-37358.
7. Pinho, João Tavares. *Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia*. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2008.
8. Enslin, J.H.R. "Renewable Energy as an Economic Energy Source for Remote Areas." *Renewable Energy* 1, no. 2 [1991]: 243–48. doi:10.1016/0960-1481[91]90082-Z.
9. Raj, Arun S., and Prakash C. Ghosh. "Standalone PV-Diesel System vs. PV-H2 System: An Economic Analysis." *Energy* 42, no. 1 [juin 2012]: 270–80. doi:10.1016/j.energy.2012.03.059.
10. Çengel, Yunus; Kanaglu, Mehmet, 2012. *Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática*. 4ª Ed. Porto Alegre, 2012.

11. Dennis Barley, C., and C. Byron Winn. "Optimal Dispatch Strategy in Remote Hybrid Power Systems." *Solar Energy* 58, no. 4–6 [October 1996]: 165–79. doi:10.1016/S0038-092X[96]00087-4.
12. Zhou, Keliang, J. A. Ferreira, and S. W. H. de Haan. "Optimal Energy Management Strategy and System Sizing Method for Stand-Alone Photovoltaic-Hydrogen Systems." *International Journal of Hydrogen Energy* 33, no. 2 [January 2008]: 477–89. doi:10.1016/j.ijhydene.2007.09.027.
13. Beluco, Alexandre. 2001. Bases para uma Metodologia de Dimensionamento de Aproveitamentos Híbridos Baseado em Energias Hidrelétricas e Fotovoltaicas. Tese de Doutorado da UFRGS, 2001.
14. Reindl, D. T., W. A. Beckman, and J. A. Duffie. "Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models." *Solar Energy* 45, no. 1 [1990]: 9–17. doi:10.1016/0038-092X[90]90061-G.
15. Custódio, Ronaldo dos Santos. Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica. Eletrobrás. Rio de Janeiro, 2009.
16. Barreto, Eduardo José Fagundes. Tecnologias de energias renováveis. Brasília. Ministério das Minas e Energia, 2008.
17. S. Sailer. Prise en compte du vieillissement dans la modélisation des batteries lithium ion. Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et Interfaces, 2014.
18. Fraga, José Renato Castro Pompéia. Análise do comportamento de bateria utilizada em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte. Tese de doutorado da Universidade Estadual Paulista, 2009.
19. Manwell, James F., and Jon G. McGowan. "Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems." *Solar Energy* 50, no. 5 [mai 1993]: 399–405. doi:10.1016/0038-092X[93]90060-2.
20. Apresentação geral sobre o BSRN, disponível no link: <http://www.bsrn.awi.de/> Acessado dia 25 de agosto de 2014.
21. Pansini, Anthony J. "Guide to electric power generation". 3rd ed. 2011.
22. Projeto Sonda de compartilhamento de dados meteorológicos disponíveis em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/brasilia.html>. Acessado dia 9/09
23. Bizagi: software livre de BPM, disponível em: <http://www.bizagi.com/> Acessado dia 30/08/2014.